

## گروه بندی جریان های پسمان نیروگاه اتمی بوشهر برای تعیین ضرایب مقیاس

کیقبادی، مهدی<sup>(۱)</sup> - صمدفام، محمد\*<sup>(۱)</sup> - آقابیگی، حمیدرضا<sup>(۲)</sup> - مفتون، ابوالفضل<sup>(۳)</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته ای

<sup>۲</sup> شرکت بهره برداری نیروگاه اتمی بوشهر

<sup>۳</sup> شرکت توسعه و ارتقاء ایمنی نیروگاه های اتمی (توانا)

### چکیده:

در این پژوهش با انتخاب هسته های گاما در پسمان نیروگاه اتمی بوشهر به عنوان هسته های  $DTM$  مجازی و محاسبه ضرایب مقیاس مجازی برای آن ها، گروه بندی جریان های پسمان با استفاده از روش های آماری مناسب انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد می توان تمامی جریان های پسمان را در یک گروه قرار داد. به عبارتی انتظار می رود یک ضریب مقیاس واحد برای تمامی جریان های پسمان کافی باشد. کلمات کلیدی: ضریب مقیاس، نیروگاه اتمی بوشهر، پسمان پرتوزا

### مقدمه:

همه کشورهای عضو آژانس بین المللی انرژی اتمی موظف اند که برای همه پسمان های هسته ای تولیدی در نیروگاه های خود، قبل از دفن نهایی، عناصر اصلی پرتوزای موجود در پسمان به همراه سطح پرتوزایی آن ها را مشخص کنند. سطح پرتوزایی برخی از این عناصر ( $ETM^1$  Nuclide) با روش ساده و غیر مخرب طیف سنجی گاما از بیرون بسته پسمان قابل اندازه گیری می باشند؛ اما سطح پرتوزایی بسیاری از این عناصر ( $DTM^2$  Nuclide) که اغلب نیمه عمر طولانی هم دارند، تنها از طریق روش های رادیوشیمی قابل اندازه گیری هستند. بدیهی است اندازه گیری تجربی سطح پرتوزایی این نوع هسته ها برای تک تک شبکه های پسمان در عمل غیرممکن می باشد. یک روش کاربردی و آسان برای تعیین سطح پرتوزایی این گروه از عناصر ( $DTM$ ) استفاده از روش ضریب مقیاس<sup>۳</sup> می باشد [۱].

روش ضریب مقیاس بر این فرض استوار است که نسبت غلظت هر یک از هسته های  $DTM$  به غلظت یکی از هسته های  $ETM$  (که به آن هسته کلیدی نیز گفته می شود) برای یک یا گروهی از جریان های پسمان همواره نسبت ثابتی است (به این نسبت ثابت، ضریب مقیاس گفته می شود)؛ بنابراین، غلظت هسته  $DTM$  مورد نظر از روی حاصل ضرب غلظت هسته کلیدی و ضریب مقیاس مربوطه تعیین می شود. یک هسته

<sup>1</sup> easy to measure

<sup>2</sup> difficult to measure

<sup>3</sup> Scaling Factor

کلیدی باید گسیلنده گاما بوده و قابل اندازه‌گیری خارج از بسته پسمان باشد. علاوه بر این باید هسته کلیدی نیمه عمر نسبتاً طولانی داشته باشد؛ بنابراین معمولاً دو هسته  $Co-60$  و  $Cs-137$  به عنوان هسته‌های کلیدی انتخاب می‌شوند [۱].

نمونه‌برداری از همه جریان‌های مختلف پسمان و آنالیز این تعداد نمونه بسیار پرهزینه خواهد بود. هم‌چنین انتظار می‌رود بسیاری از جریان‌های پسمان مشابه یکدیگر بوده و تعیین ضرایب مقیاس جداگانه برای تک تک آن‌ها ضرورتی نداشته باشد؛ بنابراین گروه بندی جریان‌های پسمان برای تعیین ضرایب مقیاس ضرورتی اجتناب ناپذیر است [۱].

### روش کار:

همانطور که در مقدمه بالا گفته شد، جریان‌های مشابه جریان‌هایی هستند که ضرایب مقیاس مشابهی دارند (نسبت هسته‌های DTM به هسته‌های کلیدی در این جریان‌ها مشابه است)؛ بنابراین، روش قطعی برای تعیین جریان‌های مشابه، تعیین ضرایب مقیاس برای تک تک این جریان‌ها خواهد بود؛ اما تعیین ضرایب مقیاس برای تمامی جریان‌ها بسیار پرهزینه و بعضاً غیر ممکن است. یک روش جایگزین برای شناسایی جریان‌های مشابه، تعیین ضرایب مقیاس مجازی برای جریان‌های پسمان و دسته بندی جریان‌های مشابه بر مبنای تشابه ضرایب مقیاس مجازی است. از این روش قبلاً برای تعیین تعداد مناسب نمونه‌برداری برای تعیین ضرایب مقیاس واقعی استفاده شده است [۲].

در این روش به جای اندازه‌گیری غلظت هسته‌های DTM واقعی و تعیین ضرایب مقیاس واقعی، تعدادی از هسته‌های پرتوزا که اندازه‌گیری آن‌ها به سادگی امکان‌پذیر باشد (با روش طیف‌سنجی گاما) به عنوان هسته‌های DTM مجازی انتخاب شده و ضرایب مقیاس مجازی برای آن‌ها تعیین می‌شود. انتخاب هسته کلیدی مناسب برای هر یک از این هسته‌های DTM مجازی و روش آماری تعیین ضرایب مقیاس دقیقاً مشابه با روش معمول برای هسته‌های DTM واقعی است. برای تعیین هسته‌های DTM مجازی هیچ نیازی به نمونه‌برداری و/یا اندازه‌گیری‌های جدید وجود ندارد. تمامی پسمان‌های آمایش شده در نیروگاه بوشهر دارای یک شناسنامه می‌باشند که غلظت برخی هسته‌های گاما (که با دستگاه گاما اسکنر نیروگاه، اندازه‌گیری شده‌اند) در آن درج شده است.

الگوریتم گروه بندی جریان‌های پسمان بر مبنای هسته‌های DTM مجازی در ۴ مرحله صورت می‌گیرد.

- ۱- شناسایی هسته‌های DTM مجازی از روی اطلاعات شناسنامه‌های شبکه‌های پسمان
- ۲- تعیین هسته کلیدی مناسب برای هر یک از هسته‌های DTM مجازی
- ۳- محاسبه ضرایب مقیاس برای هسته‌های DTM مجازی در جریان‌های مختلف پسمان و سنجش اعتبار آن‌ها

۴- گروه بندی جریان‌های پسمان با استفاده از روش‌های آماری

مرحله اول: شناسایی هسته‌های DTM مجازی

هسته‌های گاما‌زای اندازه‌گیری شده در بشکه‌های پسمان نیروگاه بوشهر حداکثر ۱۴ هسته می‌باشد که در جدول شماره ۱ به همراه نیمه عمر و مکانیزم‌های اصلی تولیدشان آورده شده‌اند.

جدول شماره (۱) هسته‌های گاما‌زای موجود در بشکه‌های پسمان

(ردیف‌های زرد: هسته‌های کلیدی)

(ردیف‌های سبز: هسته‌های DTM مجازی)

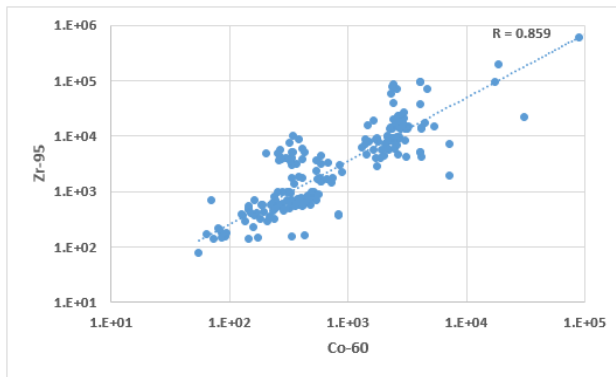
Nuclide	Half Life	Main Production Source
<b>Cs-137</b>	30.17 years	Fission Product
<b>Co-60</b>	5.2714 years	$^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$
<b>Cs-134</b>	2.0652 years	$^{133}\text{Cs} (n, \gamma) ^{134}\text{Cs}$
<b>Mn-54</b>	312.12 days	$^{54}\text{Fe} (n, p) ^{54}\text{Mn}$
<b>Zn-65</b>	244.26 days	$^{64}\text{Zn} (n, \gamma) ^{65}\text{Zn}$
<b>Co-58</b>	70.86 days	$^{58}\text{Ni} (n, p) ^{58}\text{Co}$
<b>Zr-95</b>	64.02 days	Fission Product $^{94}\text{Zr} (n, \gamma) ^{95}\text{Zr}$
<b>Sb-124</b>	60.20 days	$^{123}\text{Sb} (n, \gamma) ^{124}\text{Sb}$
<b>Fe-59</b>	44.49 days	$^{58}\text{Fe} (n, \gamma) ^{59}\text{Fe}$
<b>Nb-95</b>	34.975 days	Fission Product
<b>Cr-51</b>	27.7 days	$^{50}\text{Cr} (n, \gamma) ^{51}\text{Cr}$
<b>Cs-136</b>	13.16 days	$^{135}\text{Cs} (n, \gamma) ^{136}\text{Cs}$
<b>I-131</b>	8.0197 days	Fission Product
<b>Sb-122</b>	2.72 days	$^{121}\text{Sb} (n, \gamma) ^{122}\text{Sb}$

از آنجا که ممکن است تفاوت در زمان اندازه‌گیری سطح پرتو‌زایی برای هسته‌های پرتوزا با نیمه‌عمر کوتاه باعث اختلاف زیاد در غلظت‌های اندازه‌گیری شده باشد، هسته‌های I-131، Cs-136 و Cr-51 را نمی‌توان به عنوان هسته‌های DTM مجازی انتخاب کرد؛ بنابراین ۸ هسته که با رنگ زمینه سبز در جدول شماره ۲ نشان داده شده‌اند، به عنوان هسته‌های DTM مجازی انتخاب شدند.

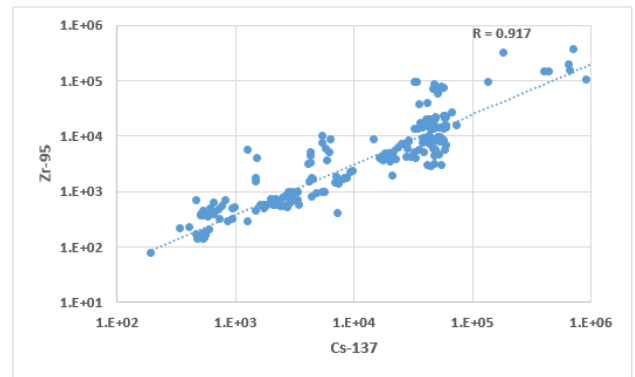
مرحله دوم: تعیین هسته کلیدی برای هسته‌های DTM مجازی

روش تعیین هسته‌های کلیدی بدین صورت است که نمودار پراکندگی غلظت هسته‌های DTM مجازی نسبت به هسته‌های Co-60 و Cs-137 را در جریان‌های مختلف پسمان رسم کرده و از روی نمودارهای پراکندگی هسته کلیدی مناسب را انتخاب می‌کنیم. بدین منظور باید بشکه‌هایی که هر یک از این هسته‌های DTM مجازی با یکی از هسته‌های کلیدی Co-60 و Cs-137 مشترکا در آن بشکه‌ها وجود دارند را در جریان‌های مختلف پسمان پیدا کنیم. این کار با استفاده از نرم افزار نوشته شده انجام شد. نمونه‌ای از

نمودارهای پراکندگی که مربوط به هسته  $Zr-95$  در جریان پسمان مایع تغلیظ شده<sup>۱</sup> می‌باشد، در شکل ۱ قابل مشاهده است. برای سایر هسته‌های  $DTM$  مجازی در جریان‌های مختلف پسمان که تعداد داده‌های آن‌ها ۵ و یا بیشتر باشد، نیز نمودارهای مشابهی رسم شده است.



(ب)



(الف)

شکل شماره (۱) نمودار پراکندگی پرتوزایی  $Zr-95$  بر حسب پرتوزایی هسته‌های کلیدی  $Cs-137$  (الف) و  $Co-60$  (ب) در هر یک از بشکه‌ها، برای جریان پسمان مایع تغلیظ شده

معمولاً ضریب همبستگی<sup>۲</sup> بزرگتر از  $۰/۶$  نشان دهنده وجود یک ارتباط معنی دار بین هسته  $DTM$  و هسته کلیدی می‌باشد [۱]. ضرایب همبستگی کوچکتر از  $۰/۶$  بدین معناست که ارتباطی بین غلظت هسته  $DTM$  مجازی با هسته کلیدی وجود ندارد. از آنجاکه هدف ما در اینجا یافتن جریان‌های مشابه است، بایستی هسته کلیدی که برای هر یک از هسته‌های  $DTM$  مجازی در جریان‌های مختلف پسمان انتخاب می‌شود، یکسان باشد. لذا هسته کلیدی انتخاب شده لزوماً هسته‌ای نیست که ضریب همبستگی بهتری را نشان دهد. معیار انتخاب نهایی، داشتن یک همبستگی معنی دار ( $>۰/۶$  ضریب همبستگی) در بیشترین تعداد جریان‌های پسمان است.

مرحله سوم: محاسبه ضرایب مقیاس و سنجش اعتبار آن‌ها

ضرایب مقیاس برای هسته‌های  $DTM$  مجازی در هر یک از جریان‌های پسمان با استفاده از روش میانگین هندسی محاسبه شده است. اعتبار ضرایب مقیاس محاسبه شده نیز با استفاده از معیار  $D_{2\sigma}$  از طریق فرمول زیر بررسی شد. هم‌چنین ضرایب مقیاس کلی برای هسته‌های  $DTM$  مجازی در همه جریان‌های پسمان بعنوان یک گروه پسمان محاسبه شده و اعتبار آن‌ها با معیار  $D_{2\sigma}$  سنجیده شد.

<sup>1</sup> Vat Residue

<sup>2</sup> Correlation Coefficient

$$D_{2\sigma} = e^{2 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(SF)_i - \ln(\overline{SF})]^2}{N-1}}} \quad (1)$$

$$\overline{SF} = e^{\left( \frac{\sum_{i=1}^N \ln(SF)_i}{N} \right)} \quad (2)$$

مقادیر  $D_{2\sigma}$  کوچکتر از ۱۰ نشان می‌دهد که بیش از ۹۵/۵ درصد داده‌ها در محدوده بین ۰/۱ تا ۱۰ برابر مقدار میانگین هندسی محاسبه شده قرار دارند و ضریب مقیاس محاسبه شده دارای اعتبار مناسبی است؛ اما در صورتی که پراکندگی داده‌ها از حد مجاز فراتر باشد ( $D_{2\sigma} < 10$ )، ضرایب مقیاس متناظر با آن معتبر نخواهد بود [۱]. با استفاده از این روش ضرایب مقیاس بدست آمده برای تمامی هسته‌های DTM مجازی انتخاب شده (ر.ک. جدول ۱) به غیر از Sb-124 دارای اعتبار قابل قبولی بوده‌اند.

مرحله چهارم: گروه بندی جریان‌های پسمان

برای تعیین جریان‌های مشابه پسمان و گروه بندی آن‌ها به دلیل این که باید چند جامعه (جریان‌های مختلف پسمان) را به طور همزمان مقایسه کرد، از آزمون ANOVA استفاده می‌کنیم. در این آزمون ابتدا فرض صفر را به این صورت در نظر می‌گیریم که اختلافی بین میانگین مجموعه‌ها وجود ندارد. فرض مقابل نیز به این صورت است که میانگین حداقل دو گروه از داده‌ها باهم برابر نباشد. برای بررسی فرض صفر، پارامتر  $f$  را با فرمول زیر محاسبه می‌کنیم.

$$f = \frac{SS_T / a - 1}{SS_E / N - a} = \frac{MS_T}{MS_E} \quad (3)$$

$f$ : آماره فیشر،  $N$ : تعداد کل داده‌ها،  $a$ : تعداد گروه‌ها (تعداد جریان‌های پسمان)

$SS_T$ : مجموع مربعات کل بین گروهی،  $SS_E$ : مجموع مربعات کل درون گروهی

$MS_T$ : واریانس بین گروهی،  $MS_E$ : واریانس درون گروهی

$f$  محاسبه شده از فرمول فوق را با مقدار  $f$  بحرانی ( $f_{critical}$ ) مقایسه می‌کنیم.  $f$  بحرانی را نیز از جداول آماری موجود، با درجات آزادی  $a-1$  و  $N-a$  و درصد خطای ۵ استخراج می‌کنیم. اگر  $f$  بدست آمده از فرمول از  $f$  بحرانی بزرگتر باشد، فرض صفر رد می‌شود و میانگین حداقل دو گروه از داده‌ها باهم اختلاف دارند؛ اما اگر  $f$  بحرانی بزرگتر باشد، نمی‌توان تفاوت میانگین‌ها را نتیجه گرفت.

## نتایج:

نتایج بدست آمده از آزمون ANOVA<sup>۱</sup> برای ۷ هسته DTM مجازی در جدول شماره ۲ آورده شده است. با توجه به جدول شماره ۲ می‌توان نتایج زیر را گرفت:

جدول شماره (۲) نتایج بدست آمده از آزمون ANOVA

pair nuclides	f	f critical
Zr-95/Cs-137	0.459	3.0356
Fe-59/Cs-137	0.166	3.9618
Nb-95/Cs-137	0.012	3.8838
Zn-65/Cs-137	0.041	3.0445
Mn-54/Co-60	2.751	2.4010
Co-58/Co-60	7.616	3.0284
Cs-134/Cs-137	1.222	2.6143

۱- در مورد ۵ هسته DTM مجازی (از ۷ هسته) می‌توان نتیجه گرفت که برای تمام جریان‌های متفاوت پسمان می‌توان از یک ضریب مقیاس یکسان استفاده کرد؛ به عبارت دیگر تمام جریان‌های پسمان را می‌توان در یک گروه طبقه بندی کرد.

۲- در مورد یکی از هسته‌های DTM مجازی (Mn-54) اختلاف مقدار f محاسبه شده با f بحرانی حدود ۰/۳ می‌باشد (حدود ۱۰٪)؛ بنابراین، با اندکی اغماض در مورد این هسته نیز می‌توان نتیجه بالا را گرفت.

۳- فقط در مورد هسته DTM مجازی Co-58 تفاوت معنی داری بین جریان‌های مختلف پسمان مشاهده می‌شود. حتی در این مورد نیز اختلاف بین f محاسبه شده و f بحرانی در حدود ۲ برابر است که مؤید تفاوت خیلی بزرگ نیست.

## بحث و نتیجه گیری:

بر مبنای محاسبات آماری فوق می‌توان تنها یک گروه پسمان در نظر گرفت و انتظار می‌رود یک ضریب مقیاس واحد برای تمامی جریان‌های پسمان کافی باشد. نتیجه گیری در مورد یکسان بودن ضرایب مقیاس برای نوع خاصی از نیروگاه‌ها نتیجه دور از ذهنی نیست و نتایج مطالعات قبلی در سایر کشورها نیز تأیید کننده نتیجه گیری بدست آمده است [۱].

<sup>1</sup> Analysis of variance

البته نظر قطعی در مورد یکسان بودن ضرایب مقیاس برای جریان های مختلف پسمان، تنها با تعیین ضرایب مقیاس برای هسته های DTM واقعی در جریان های پسمان قابل انجام خواهد بود. نتیجه گیری این گزارش صرفاً برای تخمین اولیه تعداد نمونه برداری ها و زمان بندی نمونه برداری استفاده خواهد شد.

#### مراجع:

1. Series IN, Determination and use of scaling factors for waste characterization in nuclear power plants, IAEA, Vienna (No. NW-T-1.18), 2009.
2. Mitev, K., T. Boshkova, G. Gerganov, C. Andreev, N. Kirilova, E. Stoyanova, V. Zhivkova, M. Iliev, G. Neshovska, and G. Georgiev, Determination of scaling factors for low and intermediate level dry radioactive waste from kozloduy nuclear power plant, In Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2012 IEEE, pp. 66-73, IEEE, 2012.